

УДК 621.313

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕМПФИРОВАННЫХ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

С.И. Качин, Ю.С. Боровиков

Томский политехнический университет

E-mail: borovikov@tpu.ru

Рассматривается возможность выбора оптимальной конструкции демпфированной обмотки якоря в зависимости от предполагаемых условий коммутации секций электрической машины. Показано проявление наибольшей эффективности демпфированных обмоток в режиме слабой недокоммутации, что позволяет рекомендовать настройку работы данных электрических машин именно в этом режиме.

Как отмечалось в ряде работ [1, 2], демпфированные обмотки якоря коллекторной электрической машины могут иметь большое число вариантов их выполнения, что обусловлено различными возможными соотношениями таких параметров, как число катушек в секциях, их взаимное пространственное расположение в пазах якоря, а также распределение витков секций по составляющим их катушкам. Число сочетаний указанных параметров в машинах малой мощности, имеющих, как правило, многовитковые секции, может составлять сотни вариантов, что существенно осложняет процесс выбора того или иного типа демпфированной обмотки и конкретных обмоточных данных для избранного вида конструкции обмотки. Поэтому целесообразно знать основные коммутационные возможности различных типов демпфированных обмоток, а также предпочтительное распределение витков по катушкам секции для того или иного типа обмотки [3].

С этой целью следует оценить влияние типа обмотки и соотношения между витками в катушках секций на коммутирующие свойства обмоток и на основании данного анализа выявить область оптимальных параметров обмоток для заданных условий их эксплуатации.

В качестве критерия коммутирующих свойств обмоток может быть использована величина энергии, выделяющейся в искровых разрядах под щеткой на завершающей стадии процесса коммутации. Энергия искровых разрядов рекомендована рядом исследователей в качестве критерия коммутационной напряженности электрической машины в связи с тем, что данный показатель связан с величиной электроэрозионного износа контактных элементов [4].

При исследовании коммутирующих свойств демпфированных обмоток представляет интерес как суммарное выделение энергии искрения всех секций паза, так и соотношение между энергиями искрения отдельных секций паза, которое в идеальном случае должно быть равномерным (с точки зрения одинакового электроэрозионного изнашивания коллекторных пластин). В случае, если электроэрозионная составляющая изнашивания коллекторных пластин превышает фрикционную со-

ставляющую, то с течением времени возможно изменение профиля рабочей дорожки скольжения вследствие неравномерного выделения энергии в искровых разрядах на разных коллекторных пластинах. Это может еще больше усилить неравномерность выделения энергии, что приводит к недопустимо высокому уровню искрения под щетками и выходу электрической машины из строя [5, 6].

Оценка энергии в искровых разрядах под щеткой может быть произведена с помощью решения системы дифференциальных уравнений коммутации магнитосвязанных секций численными методами на обеих стадиях коммутационного процесса (на этапе замыкания секций щеткой и во время протекания электроискрового процесса). Однако в этом случае затруднен анализ влияния различного рода факторов на коммутационный процесс вследствие большого объема вычислений.

Наиболее целесообразно воспользоваться приближенными аналитическими выражениями, полученными в [7, 8] для выявления основных закономерностей изучаемого явления и предварительной оценки коммутирующих свойств различных типов конструкций демпфированных обмоток якоря, после чего может быть сделан выбор в пользу той или иной конструкции, определена область ее наиболее вероятных оптимальных значений параметров, и затем осуществлены дополнительные уточняющие исследования с помощью более точной математической модели [9].

Анализ коммутирующих свойств вариантов обмоток якоря производится на основе энергии единичного искрового разряда i -ой секции, определяемого по выражению

$$W_i = L_{si} \frac{i_{pi}^2}{2}.$$

Для предварительной оценки величины W_i могут быть использованы зависимости для расчета тока разрыва i_p и для определения коэффициента демпфирования G [8]. При этом требуется знать величины средних коммутирующих ЭДС для одновременно коммутируемых секций якоря. Указанные параметры могут быть получены расчетным или экспериментальным путями.

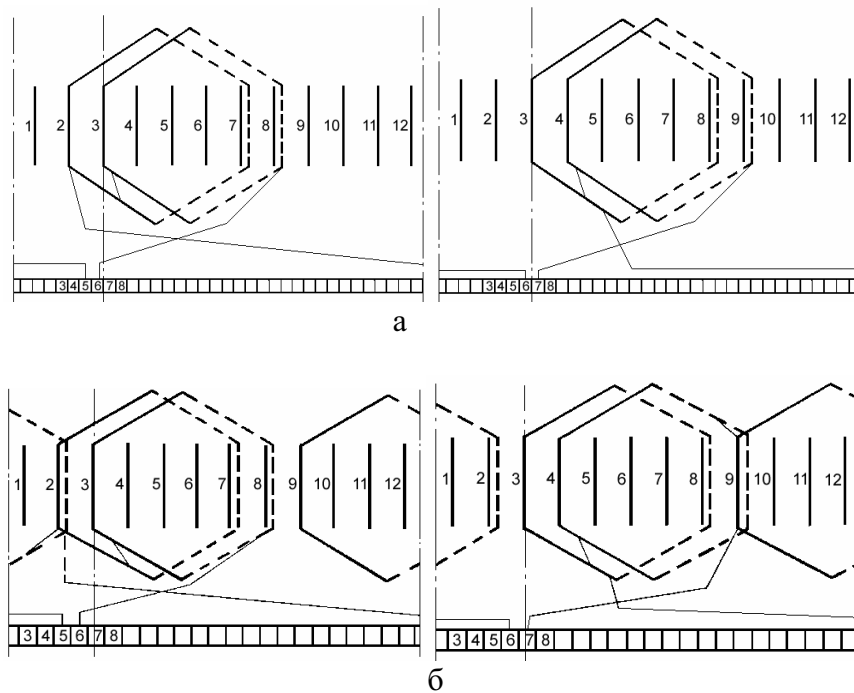


Рис. 1. Варианты исполнения демпфированных обмоток якоря: а) тип I; б) тип II

В качестве примера осуществим анализ коммутационных свойств двух типов обмоток, приведенных на рис. 1.

Поскольку в указанных конструкциях обмоток уже определено количество катушек в секциях и их расположение в пазах якоря, то основными варьируемыми параметрами являются щеточное перекрытие ($\beta_{щ}$) и соотношение чисел витков в основных катушках секций паза якоря и их дополнительных катушках. Поскольку влияние $\beta_{щ}$ на коммутационные свойства демпфированных обмоток не является преобладающим, то вопросы оптимизации этого параметра подробно в данной статье не рассматриваются. Следует иметь в виду, что $\beta_{щ}$ должно быть больше единицы и обеспечивать перекрытие ламелей одновременно коммутируемых секций на протяжении максимально возможного времени горения дуги под щеткой для обеспечения эффекта демпфирования. В ходе дальнейшего анализа $\beta_{щ}$ принималось равным 1,8.

Соотношение чисел витков в основных и дополнительных катушках секций демпфированных обмоток якоря влияет на величины индуктивностей и взаимных индуктивностей между соседними в порядке коммутации контурами.

Для обмотки на рис. 1, а, данные параметры связаны с числом витков в дополнительной катушке (при допущении отсутствия магнитной связи между катушками, лежащими в разных пазах якоря) следующими выражениями

$$\begin{aligned} L_s &= L_{s,\delta} (w_s^2 - 2w_s w_2 + 2w_2^2); \\ M_{12} &= k_{M12} L_{s,\delta} (w_s - w_2)^2 / w_s^2; \\ M_{21} &= 2k_{M21} L_{s,\delta} (w_s - w_2) w_2 / w_s^2, \end{aligned}$$

где w_2 — число витков в дополнительной катушке (катушки в пазах 2, 7 и 4, 9 на рис. 1, а); w_s — число витков в секции; $L_{s,\delta}$ — индуктивность однокатушечной секции; M_{12} — взаимная индуктивность между первой и второй секциями рассматриваемого паза; M_{21} — взаимная индуктивность между второй секцией рассматриваемого паза и первой секцией следующего (в порядке коммутации) паза; k_{M12}, k_{M21} — коэффициенты магнитной связи между катушками различных секций, лежащими в одних пазах (в расчетах принято $k_{M12} = k_{M21} = 0,9$).

Аналогичные выражения для симметричного варианта обмотки на рис. 1, б, имеют вид

$$\begin{aligned} L_s &= L_{s,\delta} (w_s^2 - w_s w_2 + 2w_2^2); \\ M_{12} &= k_{M12} L_{s,\delta} (w_s^2 - w_s w_2) / 2w_s^2; \\ M_{21} &= k_{M21} L_{s,\delta} (w_s^2 + 2w_s w_2 - 3w_2^2) / 4w_s^2. \end{aligned}$$

Диаграммы изменения L_s, M_{12}, M_{21} от отношения w_2/w_s для рассматриваемых конструкций обмоток представлены на рис. 2. Для обмотки на рис. 1 характерно достижение минимума L_s и максимума M_{21} при $w_2 \approx 0,5w_s$ (рис. 2, а). Величина M_{12} в этой обмотке снижается с увеличением w_2 (при $w_s = \text{const}$).

В обмотке на рис. 1, б, значение параметра M_{12} также снижается с повышением w_2 (рис. 2, б). Однако величина L_s имеет минимум при $w_2 \approx 0,235w_s$, а у M_{21} наблюдается максимум при $w_2 = 0,353w_s$.

В общем случае тип обмотки оказывает влияние на коммутационный процесс и на стадии замыкания коммутируемых секций щеткой, что сопровождается изменением тока разрыва [7]. О свойствах рассматриваемых обмоток в этом случае дают представление диаграммы на рис. 3, которые полу-

ченны для коммутирующих ЭДС первой и второй секций паза $e_{k1}=e_{k2}=0,4$ В, что соответствует работе базовой обмотки на нижней границе области безыскровой работы.

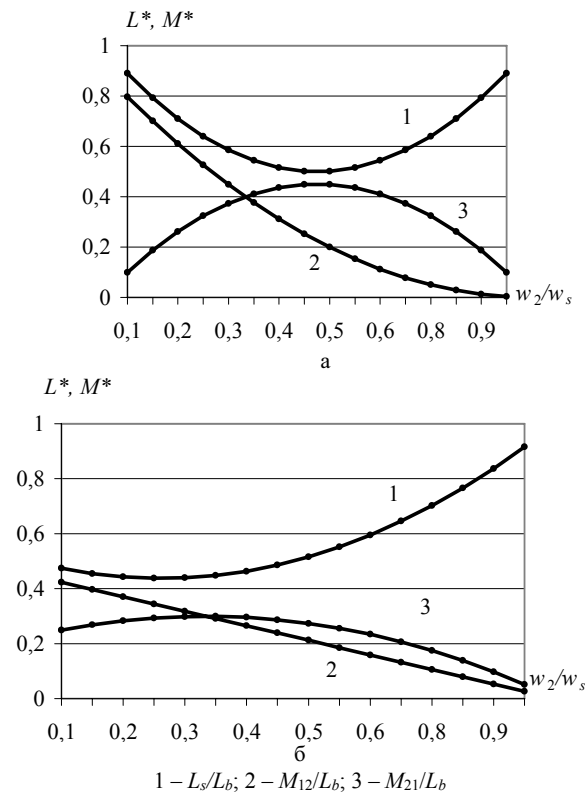


Рис. 2. Диаграммы изменения L_s , M_{12} , M_{21} в зависимости от соотношения w_2/w_s : а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II

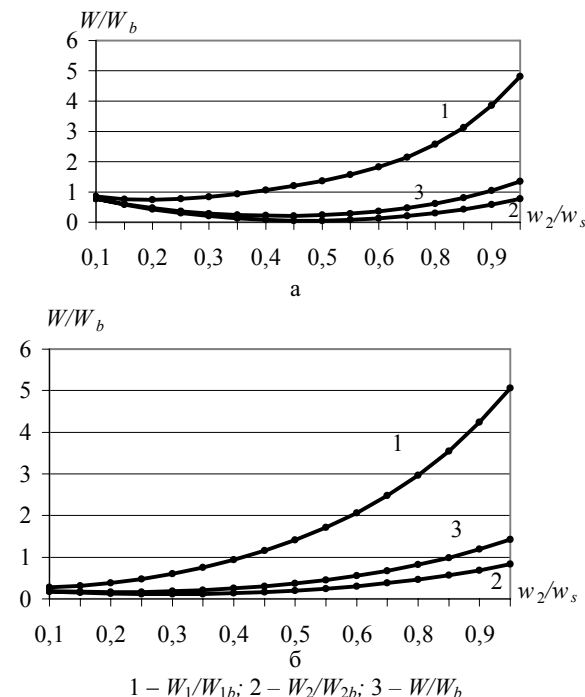


Рис. 3. Диаграммы при коммутирующих ЭДС первой и второй секций паза $e_{k1}=e_{k2}=0,4$ В: а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II

Из приведенных графиков видно, что суммарная энергия искрения обмотки по типу I (рис. 3, а) снижается более чем в 4,6 раза при $w_2=0,471w_s$. У второй обмотки данный показатель уменьшен в 6,2 раза в сравнении с базовым уровнем при $w_2=0,176$ (рис. 3, б).

Следовательно, исследуемые обмотки положительно влияют на уменьшение тока разрыва, что позволяет дополнительно снижать энергию искровых разрядов секций паза.

По-иному проявляются коммутирующие свойства исследуемых типов обмоток при работе с перекоммутацией в условиях распределения коммутирующих ЭДС в секциях паза, характерного для машин без дополнительных полюсов со сдвигом щеток против направления вращения (рис. 4–6).

В этом случае коэффициенты демпфирования могут превышать единичное значение (рис. 4), что свидетельствует о поступлении дополнительной энергии в коммутируемый контур за время искрового разряда, а отношение W_{1b}/W_{2b} в базовом варианте близко к единице, что обусловлено меньшей величиной e_{k2} по сравнению с e_{k1} . В первой демпфированной обмотке равномерное распределение энергий искрения по секциям паза наблюдается при $w_2 \approx 0,353w_s$ и при $w_2=0,529$ (рис. 5, а).

При этом энергии искрения обеих секций паза снижаются ориентировочно в 2 и более раз (рис. 6, а). Суммарная энергия снижается до $0,437W_\delta$ (W_δ – суммарная энергия искрового разряда для базового варианта обмотки) при $w_2 \approx 0,353w_s$ и до $0,297W_\delta$ при $w_2=0,529$. Величина числа витков дополнительной обмотки, равная $0,529w_s$ является в данном случае предпочтительной, поскольку при этом достигается наибольшее снижение энергий искрения секций паза.

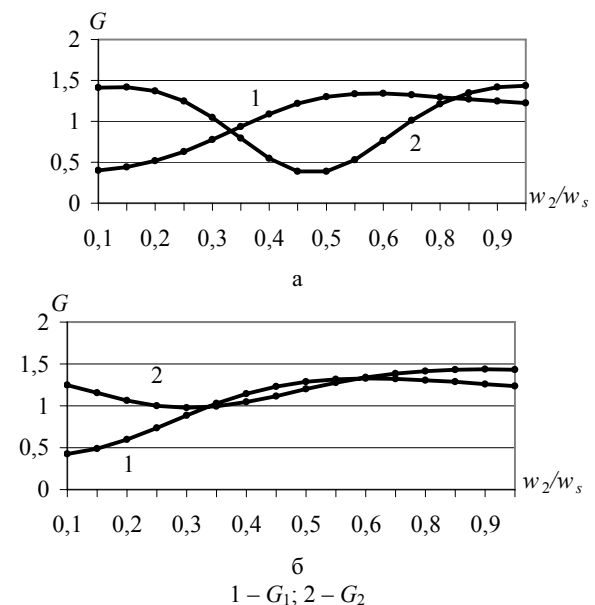


Рис. 4. Диаграммы изменения коэффициентов демпфирования для первой секции паза (G_1) и второй секции паза (G_2) при варьировании w_2 : а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II

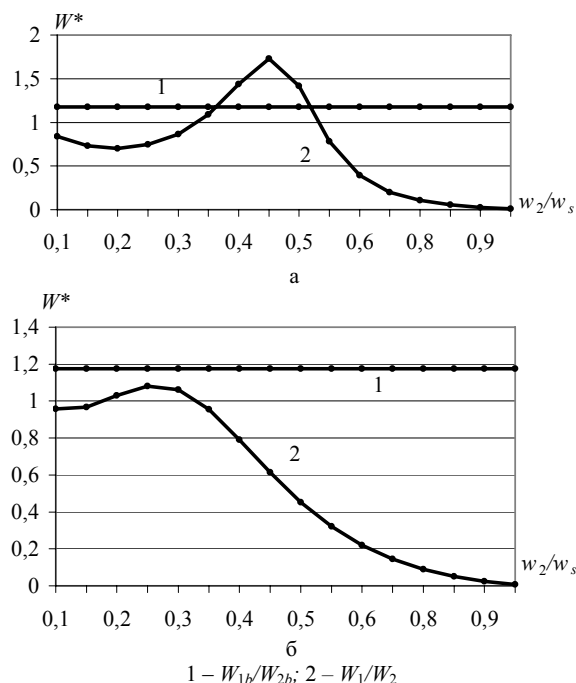


Рис. 5. Диаграммы изменения отношения энергий искрового разряда первой секции паза и второй секции паза для базового (W_{1b}/W_{2b}) и демпфированного (W_1/W_2) вариантов обмоток при варьировании w_2 : а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II

Во втором варианте демпфированной обмотки лучшие результаты достигаются при $w_2=0,176w_s$, когда выравниваются энергии искрения секций паза (рис. 5, б) и суммарная энергия искрения паза снижается до $0,339W_\delta$ (рис. 6, б), что почти совпадает с ее минимальной величиной, равной $0,337W_\delta$ при $w_2=0,118w_s$. Однако данные показатели несколько хуже, чем у первого варианта демпфированной обмотки.

Следовательно, первый вариант демпфированной обмотки лучше работает в области перекоммутации, а второй вариант демпфированной обмотки показывает лучшие результаты в области недокоммутации. Причем в области перекоммутации коммутирующие свойства повышаются по мере увеличения уровня перекоммутации, а в области недокоммутации наблюдается обратная картина.

Выводы

Таким образом, исследуемые типы демпфированных обмоток по-разному работают при недокоммутации и перекоммутации, что позволяет сде-

лать первоначальный выбор конструкции в зависимости от предполагаемых условий коммутации секций электрической машины.

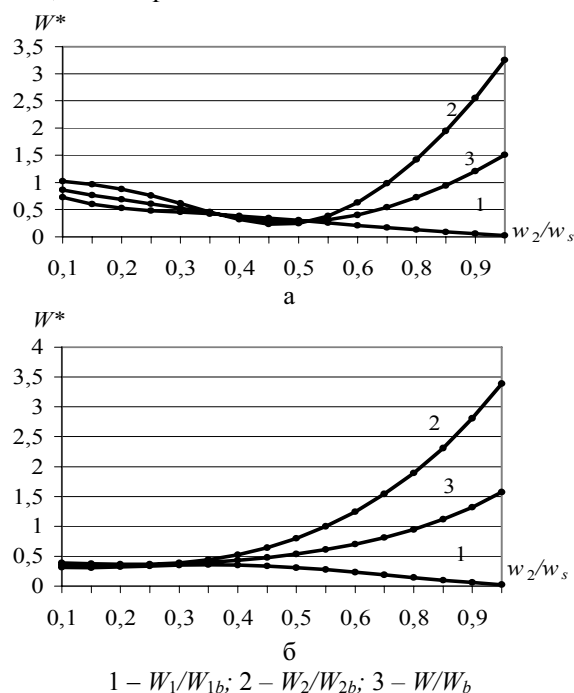


Рис. 6. Диаграммы изменения отношения энергий искрового разряда базового и демпфированного вариантов обмоток при варьировании w_2 : а) для типа обмотки I; б) для типа обмотки II

Каждая из рассмотренных демпфированных обмоток имеет свою характерную область параметра w_2 , в которой достигается выравнивание энергий искрения по секциям паза при снижении суммарной энергии искрения. Поэтому в каждом конкретном случае следует искать оптимальное значение числа витков дополнительной обмотки именно в этих областях. При этом максимальная энергия искрения секций может снижаться до десяти и более раз, а также уменьшаться суммарная энергия искрения в аналогичных пределах.

Наибольшая эффективность демпфированных обмоток проявляется в режиме слабой недокоммутации, что позволяет рекомендовать настройку работы электрических машин с демпфированными обмотками именно в этом режиме.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом с Федеральным агентством по науке и инновациям РФ № 02.442.11.7267 от 28.02.2006 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толкунов В.П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. — М.: Энергия, 1979. — 224 с.
2. Качин С.И. Высокоиспользованные коллекторные электрические машины малой мощности: Дис. ... докт. техн. наук. — Томск, 2002. — 438 с.
3. Качин С.И. Улучшение эксплуатационных характеристик коллекторных машин малой мощности // Электричество. — 1997. — № 6. — С. 28–32.
4. Толкунов В.П., Карпенко Ф.Т., Белошенко В.И., Осетрова З.М. Энергетический критерий коммутации машин постоянного тока // Известия вузов. Электромеханика. — 1974. — № 7. — С. 720–723.
5. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Качин О.С. Повышение ресурсных характеристик скользящего контакта коллекторных машин электроприводов // Известия вузов. Электромеханика. — 2006. — № 3. — С. 42–47.
6. Trutt F.C., Sottile J.K., Kohler J.L. Detection of AC Machine Winding Deterioration Using Electrically Excited Vibrations // IEEE Trans. Ind. Appl. — 2001. — V. 37. — № 1. — P. 10–14.
7. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Качин О.С., Клыжко Е.Н. Коммутирующие свойства обмоток якорей коллекторных машин электроприводов на начальном этапе коммутации // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 5. — С. 136–140.
8. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Качин О.С., Саблуков В.Ю., Клыжко Е.Н. Анализ коммутирующих свойств обмоток якорей электроприводов на завершающей стадии процесса коммутации // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 103–106.
9. Боровиков Ю.С. Программно-аппаратные средства для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин: Дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 2003. — 155 с.

УДК 519.71:622.276

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИН НА НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ ФИЛЬТРАЦИИ С УЧЕТОМ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.Л. Сергеев, П.В. Сергеев

Томский политехнический университет
E-mail: SVL@mail.tomsknet.ru

Рассматривается задача идентификации гидродинамических параметров скважин на неуставившихся режимах фильтрации методом кривой восстановления давления с учетом дополнительной априорной информации и экспертных оценок. Приводятся результаты анализа точности оценок пластового давления и фильтрационных параметров пласта.

Задачей идентификации гидродинамических параметров скважин является построение оптимальной, в смысле заданных критериев качества, математической модели пластовой системы по результатам измерений забойного давления и дебитов скважин. Методы идентификации для гидродинамических исследований скважин (ГДИС) [1, 2] позволяют получать данные о фильтрационных и динамических свойствах нефтяных пластов и призабойной зоны скважины, определять параметры трещин гидроразрыва пласта, уточнять пластовое давление, оценивать геометрические параметры пласта и т. д. На основе ГДИС осуществляются процессы добычи флюидов, составляются технологические проекты разработки нефтяных и газовых месторождений, создаются геолого-технологические модели процессов нефтегазодобычи.

Одним из основных методов ГДИС на неуставившихся режимах фильтрации является метод кривой восстановления забойного давления (КВД), полученной при непосредственном измерении давления на забое скважины либо рассчитанной по измеренным значениям динамического уровня (метод КВУ) [1]. Наиболее общим решением задачи идентификации ГДИС по КВД является метод интегрированных моделей, который позволяет учитывать различную неоднородную, допол-

нительную априорную информацию, дает оптимальное решение задачи идентификации с обеспечением устойчивости решения, согласованности исходных данных и дополнительных априорных сведений [3–5].

Данная работа является развитием технологии интегрированных моделей при идентификации ГДИС по КВД на основе непараметрического метода аналогов (НМА) [6], который обладает гибким механизмом учета дополнительной априорной информации, представленной классом непараметрических моделей. Необходимость использования непараметрических методов связана с отсутствием достоверной информации о моделях дополнительных априорных сведений и экспертных оценок о параметрах пласта.

Предлагаемый в работе подход к идентификации ГДИС основан на стохастической непараметрической интегрированной системе моделей КВД вида:

$$\begin{cases} P_i^* = P_i(\alpha, q) + \xi, \\ \bar{P}_{ni} = \varphi(P_i(\alpha, q(T)) + \eta, \\ \bar{\alpha}_k = f_k(\alpha_k) + v_k, k = \overline{1, l}, \end{cases} \quad (1)$$

где $P_i^* = (P_i^*(t_i), i = \overline{1, n})$, $P_i(\alpha, q) = (P_i(t_i, \alpha, q(t_i)), i = \overline{1, n})$ — векторы измеренных на скважине значений забойного